JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(1) : 45-59 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.1.45

국내 KBS-3 방식 고준위방사성폐기물 심층처분시설 방사선학적 안전성 평가 대상 방사성핵종 목록 선정개념(안) 제언

김석훈[1,*], 이동현[1], 박동극[2]

[1](주)미래와도전, [2]한국방사성폐기물학회

Suggestion on Screening Concept of Radionuclides to be Considered for the Radiological Safety Assessment of the Domestic KBS-3 Type Geological Disposal Facility of High-level Radioactive Waste (HLW)

Sukhoon Kim[1,*], Donghyun Lee[1] and Dong-Keuk Park[2]

[1]FNC Technology Co., Ltd., 32F, 13, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16954, Republic of Korea
[2]Korean Radioactive Waste Society, 111, Daedeok-daero, 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea

Abstract The transport calculation for a wide variety of radionuclides contained in high-level radioactive waste, especially spent nuclear fuel, is computationally difficult, and input data collection for this also take a considerable amount of time. Accordingly, considering limited resources, it is possible to reduce the calculation time while minimizing impact on accuracy by including only radionuclides important to calculation result through applying some criteria among potential radiation source terms that may release into environment. In this paper, therefore, we reviewed and analyzed the screening process performed to select radionuclides to be considered in the safety assessment for the KBS-3 type repository in Sweden and Finland. In both countries, it was confirmed that a list of radionuclides was selected by comprehensively considering screening criteria such as radioactivity inventory, half-life, radiotoxicity, risk quotient, and transport properties, and etc. A comparison of radionuclides included in the radiological safety assessment in both countries suggests that most of nuclides are considered in common, and a few nuclides considered only in one country are due to differences in decay chain treatment or spent fuel types. As of now, since most of information on the disposal facility in Korea has not been determined, it is necessary to comprehensively model release and transport of all radionuclides considered in Sweden and Finland when performing the radiological safety assessment. Based on these results, we derived the screening concept of selecting a list of radionuclides to be considered in the radiological safety assessment for the domestic KBS-3 type geological disposal facility, and this result is expected to be used as technical basis for confirming conformity with the safety objective. In a more detailed evaluation reflecting domestic characteristics in the future, it would be desirable to consider only radionuclides selected in accordance with the screening procedure. However, further research should be conducted to determine the quantitative limit for each criteria.

Key words: Radionuclide screening, Radiological safety assessment, KBS-3 type disposal, Deep geological repository

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Sukhoon Kim
Tel. +82-31-8065-5181 Fax. +82-31-8065-5111 E-mail. kuni0808@fnctech.com
Received 17 February 2023 **Revised** 20 February 2023 **Accepted** 8 March 2023

1. 서 론

우리나라에서 고준위방사성폐기물(이하 '고준위방폐물')은 원자력안전법 시행령[1] 제2조제1호 및 원자력안전위원회 고시 제2019-10호[2] 제3조에 따라 정의되며, 일반적으로 '사용후핵연료'와 동일한 의미로 사용되고 있다. 현재까지 국내에서 발생된 사용후핵연료는 발생지인 원전 내 임시저장시설에서 저장·관리되고 있다. 향후 이러한 임시저장시설의 포화 및 원전 해체 추진에 대비하여 고준위방폐물 관리시설을 차질 없이 확보하기 위한 근본적인 대책을 조속히 수립해야 한다.

'방사성폐기물 관리법[3]' 제6조에 따라 2021년 산업통상자원부에서 수립·발표한 '제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획(안)[4]'에서는 고준위방폐물 영구처분시설의 경우 지하연구시설 실증연구 종료 후 약 10년 내 확보를 목표로 핀란드식 심층처분에 활용되고 있는 KBS-3 방식의 다중방벽시스템을 우선 고려하되 심부시추공 등의 기술적 대안도 병행하여 추진하는 방안을 제시하였다.

고준위방폐물을 지하 깊은 곳의 안정한 지층구조에 처분하여 인간 생활권으로부터 영구히 격리시키는 심층처분시설에 대해서는 폐쇄 후 자연현상 또는 인간침입으로 초래될 수 있는 방사선피폭으로부터 인간을 보호하기 위해 안전목표치가 설정된다[5]. 이에 따라 고준위방폐물 심층처분시설은 폐쇄 후 해당 시설로 인한 방사선영향이 대표인에 대한 연간 총 위험도 및 연간 예상 피폭선량 목표치 이하가 되도록 설계되어야 한다. 즉, 고준위방폐물 심층처분시설의 기초연구, 부지조사, 설계, 건설, 운영, 폐쇄 및 폐쇄 후 관리 등 해당 처분시스템의 전체 단계에 걸쳐 해당 시설이 안전목표치에 부합함을 입증해야 하며, 이는 일반적으로 수학적 예측모델 기반의 안전성 평가를 통해 확인할 수 있다. 이러한 결과의 신뢰도 향상을 위해 방사선원항, 방사성물질 누출 메커니즘, 수송 및 피폭 매체·메커니즘 등을 규명하여 적절한 방법으로 모델링에 반영해야 한다.

고준위방폐물, 특히 사용후핵연료에는 다수의 다양한 핵분열생성물, 방사화생성물 및 초우라늄 핵종 등 매우 다양한 종류의 방사성핵종이 포함되어 있으며, 이러한 핵종의 수송 계산은 전산적으로 어려울 뿐만 아니라 이를 위한 데이터 수집 및 입력자료 설정에도 상당한 시간이 소요된다. 이에 따라 한정된 자원을 고려하여 근계·원계영역 및 생태계로 누출될 수 있는 잠재적 방사선원항 중 특정 기준을 적용하여 계산결과에 중요한 영향을 미치는 핵종만 포함하여 처분 안전성 평가를 수행함으로써 정확도에 미치는 영향을 최소화하면서 계산시간을 단축할 수 있다.

이에 본 논문에서는 전 세계적으로 직접처분 정책을 처분방침으로 채택하고 있는 국가 중 KBS-3 방식을 활용한 심지층 처분시설 건설계획에 대한 승인이 완료된 스웨덴 및 핀란드의 처분 안전성 평가를 위한 방사성핵종 선정과정을 검토 및 분석하였다. 또한, 이를 토대로 국내 사용후핵연료 관리시설 설계기술 개발의 일환으로 수행되어야 하는 방사선학적 안전성 평가에서 고려되어야 하는 방사성핵종 목록 선정개념(안)을 도출하였다.

2. 재료 및 방법

스웨덴에서는 2009년 포스마크(Forsmark)를 고준위방폐물 최종처분지로 결정하였으며, 향후 처분 실시주체인 SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company)는 2011년 3월 사용후핵연료 심층처분장의 건설허가를 정부에 신청하였다. 2022년 1월 스웨덴 정부는 이를 최종 승인하였으며, 이에 따라 SKB는 다음 단계로 토지환경 지방법원 및 스웨덴 방사선안전청(Swedish Radiation Safety Authority)의 허가를 득한 후 처분장 건설에 착수할 예정이다.

한편, 핀란드에서는 2001년 올킬루오토(Olkiluoto)를 고준위방폐물 최종처분지로 결정하였으며, 향후 처분 실시주체인 POSIVA는 2012년 12월에 사용후핵연료 심층처분장의 건설허가를 정부에 신청하였다. 2015년 11월 핀란드 정부는 이를 최종 승인하였으며, 이에 따라 POSIVA는 2016년에 처분장 건설에 착수하여 2021년 운영허가를 신청하였으며, 2025년부터 본격 운영을 목표로 하고 있다.

본 논문에서는 스웨덴 및 핀란드 고준위방폐물 심층처분장의 건설허가 신청을 위한 방사성핵종 누출 및 수송 평가과정에서 수행된 대상 핵종 선정과정을 검토하였으며, 이에 대한 보다 자세한 내용을 이하에 기술하였다.

2.1. 스웨덴 사례

대부분의 방사성핵종 수송 계산 케이스의 경우 확률론적 계산을 위해 일부 입력변수에 대한 분포를 반영하여 수백~수천 번의 반복 실행이 수반되며, 이에 따라 계산에

Table 1. Selected radionuclides considered for the radionuclide transport calculation on the KBS-3 repository in Sweden

Category		Important (33)*		Less important† (15)		Need only inventory and half-life (8)	
Fission and activation products		• ^{14}C • ^{135}Cs • ^{129}I • ^{59}Ni • ^{79}Se • ^{90}Sr • ^{93}Zr	• ^{36}Cl • ^{137}Cs • ^{94}Nb • ^{107}Pd • ^{126}Sn • ^{99}Tc	• ^{108m}Ag • ^{152}Eu • ^{93m}Nb • ^{151}Sm • ^{166m}Ho	• ^{113m}Cd • ^{3}H • ^{63}Ni • ^{121m}Sn • ^{93}Mo		
Decay chain	4n	• ^{240}Pu • ^{232}Th	• ^{236}U	• ^{244}Cm			
	4n + 1	• ^{245}Cm • ^{237}Np • ^{229}Th	• ^{241}Am • ^{233}U	• ^{241}Pu		• ^{237}U	• ^{233}Pa
	4n + 2	• ^{246}Cm • ^{238}U • ^{230}Th • ^{210}Pb	• ^{242}Pu • ^{234}U • ^{226}Ra	• ^{242m}Am	• ^{238}Pu	• ^{242}Am • ^{238}Np • ^{234m}Pa	• ^{242}Cm • ^{234}Th
	4n + 3	• ^{243}Am • ^{235}U • ^{227}Ac	• ^{239}Pu • ^{231}Pa	• ^{243}Cm		• ^{239}Np	

Notes) *Values enclosed in parenthesis represent the total number of nuclides categorized into each group.
†Nuclides that might be important in the hypothetical case with initial defect in the canister.

포함되는 핵종의 개수를 최소화하는 것이 중요하다. 방사성핵종은 계산결과에 미치는 중요도에 따라 3개 그룹, 즉 "Important", "Less important", "재고량 및 반감기 자료만 필요"로 구분된다[6]. 이 중 "Less important" 그룹은 캐니스터의 초기 결함을 포함하는 "What-if" 케이스에만 중요할 수 있는 핵종으로 구성된다. 스웨덴 심층처분장에 대한 방사성핵종 수송 계산을 위해 선정된 핵종 목록 및 그룹 분류결과를 요약하면 Table 1과 같으며, 해당 결과에 대한 보다 세부적인 도출과정은 다음과 같다.

2.1.1. 가상 케이스 설정

방사성핵종 선정을 위해 완충재 및 캐니스터를 우회하는 부식 케이스와 동일한 가상의 케이스를 설정한 후 COMP23 전산코드를 사용하여 이에 대한 수송 계산을 수행하였다. 캐니스터에는 초기에 대형 결함이 존재하며, 암반에서의 지연효과는 무시하였다. 또한, 10^{-7} yr^{-1}의 핵연료 용해속도 및 즉각 방출분율(Instant Release Fraction of inventory, 'IRF')이 고려되었다. 이러한 가상 케이스에는 심층처분장 계획 및 사양 결정을 위해 수행된 재고량 계산결과[7]의 일부(BWR38)를 적용하였으며, 단수명 방사성핵종의 잠재적 선량을 나타내기 위해 현실적인 경우에 비해 보다 신속한 방출을 가정한다.

2.1.2. 핵분열생성물 및 방사화생성물

재고량 정보(즉, BWR38)[7]에 포함된 모든 핵분열생성물 및 방사화생성물 핵종을 대상으로 운영후 40년 경과 시점에서의 재고량 및 경구 섭취에 대한 선량계수[8]를 곱한 값에 해당하는 총 방사성독성(Radiotoxicity)을 계산한 후 이를 반감기에 따라 Fig. 1과 같은 형태의 그래프로 정리하였다.

이후 Fig. 1에서 우선적으로 전체 계산결과에 대한 기여도가 낮을 것으로 예상되는 반감기 10년 미만('Criterion 1') 또는 총 방사성독성 0.1 미만('Criterion 2') (^{129}I의 0.1% 수준)인 핵종을 제외하였다. 이러한 단순 정렬작업을 통해 최초 39개의 핵종 목록을 다음 23개 핵종으로 감소시킬 수 있다; ^{3}H, ^{14}C, ^{36}Cl, ^{59}Ni, ^{63}Ni, ^{79}Se, ^{90}Sr, ^{93}Mo, ^{93m}Nb,

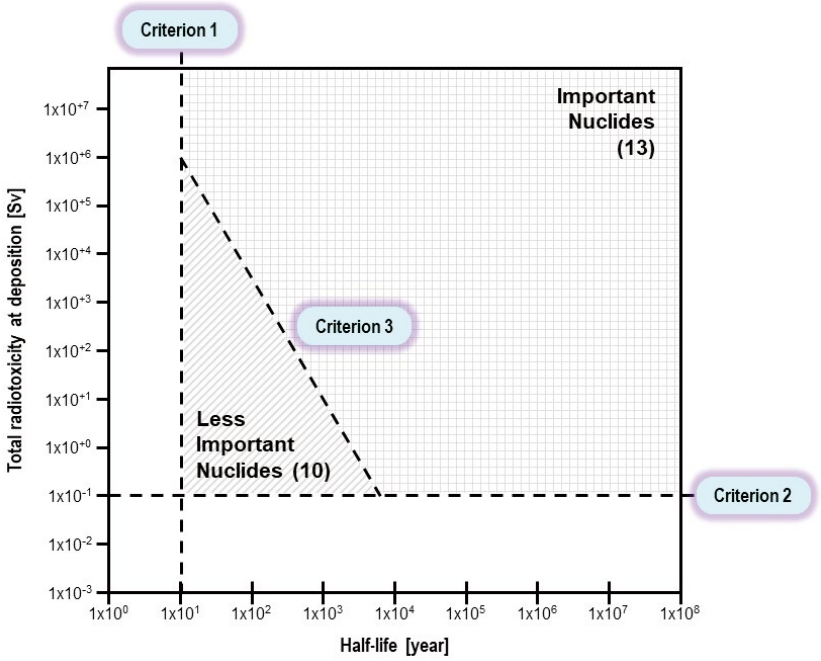

Fig. 1. Selection process of fission and activation products to be included in the radionuclide transport calculation based on half-life and radiotoxicity (Sweden). Radionuclides plotted in the checked and shaded parts are categorized as 'important' and 'less important' nuclides in the calculation, respectively.

^{93}Zr, ^{94}Nb, ^{99}Tc, ^{107}Pd, ^{108m}Ag, ^{113m}Cd, ^{121m}Sn, ^{126}Sn, ^{129}I, ^{135}Cs, ^{137}Cs, ^{151}Sm, ^{152}Eu, ^{166m}Ho.

정상 케이스의 경우 Fig. 1의 좌측 하단 부분이 선량에 대한 기여도가 가장 낮으므로 해당 그림에 표시된 추가적인 직선('Criterion 3')을 적용하여 추가적으로 선별할 수 있으며, 이를 통해 다음 13개 핵종으로 감소시킬 수 있다; ^{14}C, ^{36}Cl, ^{59}Ni, ^{79}Se, ^{90}Sr, ^{93}Zr, ^{94}Nb, ^{99}Tc, ^{107}Pd, ^{126}Sn, ^{129}I, ^{135}Cs, ^{137}Cs. 단, 이 과정에서 제외된 10개 핵종(즉, ^{3}H, ^{63}Ni, ^{93}Mo, ^{93m}Nb, ^{108m}Ag, ^{113m}Cd, ^{121m}Sn, ^{151}Sm, ^{152}Eu, ^{166m}Ho)은 캐니스터에 초기 결함이 존재하는 "What-if" 케이스에 대해서는 중요할 수 있으므로 "Less important"로 분류하였다.

SKB에서는 가상 케이스를 대상으로 한 연간 선량 평가를 통해 총 선량에 대한 23개 핵종의 상대적 기여도를 고려하여 ^{59}Ni 및 ^{94}Nb를 제외한 나머지 핵종에 대한 "Important" 및 "Less important" 분류가 합리적임을 확인하였다. ^{59}Ni 및 ^{94}Nb 핵종의 경우 Fig. 1 적용과정에서는 "Important"로 분류되었으나, 가상 케이스에 대한 평가결과에서는 장기적 관점에서 중요성이 낮은 것으로 나타났다. 단, 이는 가상 케이스에서 매우 높은 즉각 방출분율(100%)을 가정하였기 때문인 것으로 추정되며, 이러한 2가지 핵종은 반감기, 방사성독성 등에 따라 수송 계산에 여전히 중요한 것으로 고려하였다.

방사성핵종 수송 계산에 포함되는 핵분열생성물 및 방사화생성물 핵종 선정과정을 요약하면 Table 2와 같다.

2.1.3. 붕괴사슬 핵종

모든 악티나이드 및 기타 일부 핵종은 상호 연관관계가 없는 4가지 붕괴계열(즉, 4n~4n+3 계열) 중 하나에 포함된다. 이러한 붕괴계열은 방사성핵종 수송 계산에서 다음에 따라 단순화하여 취급할 수 있다.

- 일반적으로 단반감기 딸핵종은 모핵종과 평형상태인 것으로 가정할 수 있으며, 이에 따라 방사성핵종 수송 계산에서 제외 가능: 단, 해당 핵종은 모핵종에 대한 선량환산인자에 포함
- 붕괴계열 초기 일부 단반감기 핵종은 해당 핵종의 초기양(몰)을 딸핵종에 합산하여 단순한 방법으로 취급 가능: 즉, 방사성핵종 수송 계산에 특정 핵종을 명시적으로 포함하지 않은 상태로 총 선량에 대한 영향 포함

각 계열에 대해 가상 케이스를 대상으로 하는 계산 이전 일차적으로 핵종을 선별하여 붕괴도를 단순화하였다.

Table 2. Screening results of fission and activation products to be included in the radionuclide transport calculation based on half-life and radiotoxicity of each nuclide (Sweden).

Nuclide	Half-life [yr]	Inventory [Bq MTU^{-1}]	Dose coefficient [Sv Bq^{-1}]	Radiotoxicity [Sv]	Screening*			Category†
					1	2	3	
^{108m}Ag	4.18×10^{2}	4.98×10^{8}	2.30×10^{-9}	1.15×10^{0}			OUT	L.IMP
^{14}C	5.73×10^{3}	5.00×10^{10}	5.80×10^{-10}	2.90×10^{1}				IMP
^{41}Ca	1.03×10^{5}	6.49×10^{6}	1.90×10^{-10}	1.23×10^{-3}		OUT		EXC
^{113m}Cd	1.41×10^{1}	2.03×10^{11}	2.30×10^{-8}	4.68×10^{3}			OUT	L.IMP
^{36}Cl	3.01×10^{5}	5.46×10^{8}	9.30×10^{-10}	5.08×10^{-1}				IMP
^{60}Co	5.27×10^{0}	8.92×10^{11}	3.40×10^{-9}	3.03×10^{3}	OUT			EXC
^{134}Cs	2.06×10^{0}	9.10×10^{9}	1.90×10^{-8}	1.73×10^{2}	OUT			EXC
^{135}Cs	2.30×10^{6}	2.05×10^{10}	2.00×10^{-9}	4.10×10^{1}				IMP
^{137}Cs	3.01×10^{1}	1.79×10^{15}	1.30×10^{-8}	2.33×10^{7}				IMP
^{152}Eu	1.35×10^{1}	3.28×10^{10}	1.40×10^{-9}	4.59×10^{1}			OUT	L.IMP
^{154}Eu	8.59×10^{0}	1.84×10^{13}	2.00×10^{-9}	3.68×10^{4}	OUT			EXC
^{155}Eu	4.76×10^{0}	7.75×10^{11}	3.20×10^{-10}	2.48×10^{2}	OUT			EXC
^{55}Fe	2.73×10^{0}	9.29×10^{9}	3.30×10^{-10}	3.07×10^{0}	OUT			EXC
^{3}H	1.23×10^{1}	3.18×10^{12}	1.80×10^{-11}	5.72×10^{1}			OUT	L.IMP
^{166m}Ho	1.20×10^{3}	7.47×10^{7}	2.00×10^{-9}	1.49×10^{-1}			OUT	L.IMP
^{129}I	1.57×10^{7}	1.32×10^{9}	1.10×10^{-7}	1.45×10^{2}				IMP
^{93}Mo	4.00×10^{3}	4.42×10^{7}	3.10×10^{-9}	1.37×10^{-1}			OUT	L.IMP
^{93m}Nb	1.61×10^{1}	6.54×10^{10}	1.20×10^{-10}	7.85×10^{0}			OUT	L.IMP
^{94}Nb	2.03×10^{4}	2.88×10^{9}	1.70×10^{-9}	4.90×10^{0}				IMP
^{59}Ni	7.60×10^{4}	8.79×10^{10}	6.30×10^{-11}	5.54×10^{0}				IMP
^{63}Ni	1.00×10^{2}	9.29×10^{12}	1.50×10^{-10}	1.39×10^{3}			OUT	L.IMP
^{107}Pd	6.50×10^{6}	4.86×10^{9}	3.70×10^{-11}	1.80×10^{-1}				IMP
^{146}Pm	5.53×10^{0}	9.84×10^{8}	9.00×10^{-10}	8.86×10^{-1}	OUT			EXC
^{147}Pm	2.62×10^{0}	1.54×10^{11}	2.60×10^{-10}	4.00×10^{1}	OUT			EXC
^{87}Rb	4.75×10^{0}	8.85×10^{5}	1.50×10^{-9}	1.33×10^{-3}		OUT		EXC
^{106}Ru	1.02×10^{0}	2.66×10^{4}	7.00×10^{-9}	1.86×10^{-4}	OUT			EXC
^{125}Sb	2.76×10^{0}	1.23×10^{10}	1.10×10^{-9}	1.35×10^{1}	OUT			EXC
^{126m}Sb	3.64×10^{-5}	2.25×10^{10}	3.60×10^{-11}	8.10×10^{-1}	OUT			EXC
^{79}Se	1.13×10^{6}	2.76×10^{9}	2.90×10^{-9}	8.00×10^{0}				IMP
^{151}Sm	9.00×10^{1}	9.36×10^{12}	9.80×10^{-11}	9.17×10^{2}			OUT	L.IMP
^{121}Sn	3.09×10^{-3}	5.74×10^{10}	2.30×10^{-10}	1.32×10^{1}	OUT			EXC
^{121m}Sn	5.50×10^{1}	7.39×10^{10}	3.80×10^{-10}	2.81×10^{1}			OUT	L.IMP
^{126}Sn	1.00×10^{5}	2.25×10^{10}	4.70×10^{-9}	1.06×10^{2}				IMP
^{90}Sr	2.88×10^{1}	1.20×10^{15}	2.80×10^{-8}	3.36×10^{7}				IMP
^{99}Tc	2.11×10^{5}	5.72×10^{11}	6.40×10^{-10}	3.66×10^{2}				IMP
^{125m}Te	1.57×10^{-1}	3.00×10^{9}	8.70×10^{-10}	2.61×10^{0}	OUT			EXC
^{90}Y	7.31×10^{-3}	1.20×10^{15}	2.70×10^{-9}	3.24×10^{6}	OUT			EXC
^{91}Y	1.60×10^{-1}	3.34×10^{-3}	2.40×10^{-9}	8.02×10^{-12}	OUT			EXC
^{93}Zr	1.53×10^{6}	5.59×10^{10}	1.10×10^{-9}	6.15×10^{1}				IMP

Notes) *In these columns, "OUT" represents that the corresponding nuclide is screened out by applying criterion 1 through 3 shown in Fig. 1, respectively.
†In this column, "IMP", "L.IMP", and "EXC" represent "important", "less important", and "excluded" radionuclide in the transport calculation, respectively.

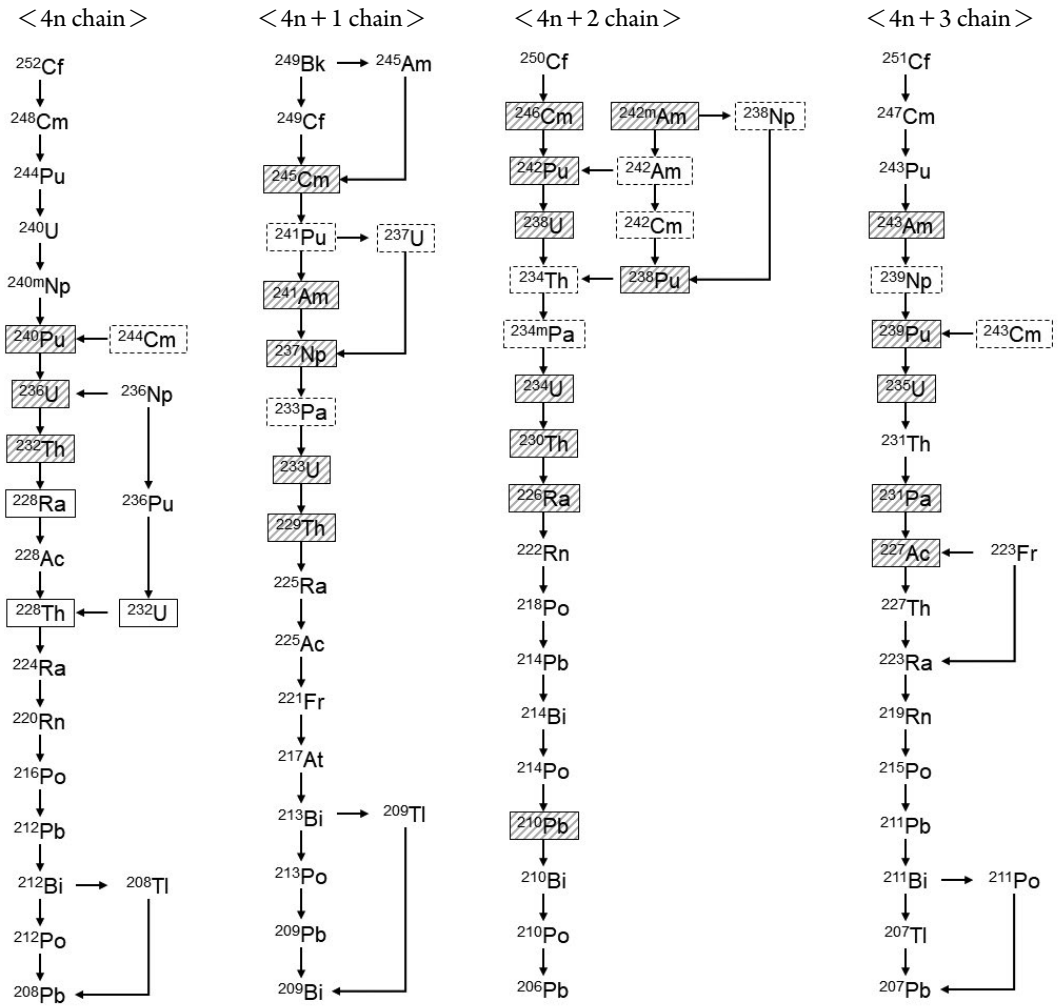

Fig. 2. Decay chains to stable isotopes for 4n through 4n＋3 nuclides in the radionuclide transport calculation (Sweden). The simplified chain for the hypothetical case supporting the selection only consists of radionuclides marked with the rectangle. Nuclides indicated by dotted lines refer to those implicitly included by adding to inventory of parent(s) and/or daughter(s). In addition, the shaded nuclides are those finally determined to be considered in the calculation.

초기 재고량이 '0'인 모핵종은 제외하였으며, 반감기가 1년 미만인 핵종은 상기 불릿에 기술된 바와 같이 취급하였다.

붕괴계열은 특히 COMP23 및 FARF31 코드를 활용한 수송 계산에서 시간이 많이 소요되므로, 선량에 대한 기여도를 무시할 수 있는 핵종은 제외하는 것이 합리적이다. 계산에 앞서 제외 여부를 결정하기 어려운 일부 핵종은 안전성 측면에서 모든 결정론적 계산에 포함하였으며, 이러한 결과를 통해 특정 붕괴계열에 의한 전체 선량에 대한 기여도가 미미한 수준으로 확인된 핵종은 보다 많은 시간이 소요되는 확률론적 계산에서 제외하였다.

4가지 붕괴계열 각각에 대해 수송 계산에 포함되는 방사성핵종 선별과정 및 그 결과를 이하에 세부적으로 기술하였으며, 해당 내용을 요약하면 Fig. 2와 같다. 해당 그림 중 직사각형 내에 표기된 핵종만 가상 케이스 계산에 사용된 단순 붕괴사슬에서 고려되며, 점선으로 표기된 핵종은 모핵종 및/또는 딸핵종 재고량에 합산함으로써 잠재적으로 포함되는 경우를 의미한다. 또한, 최종적으로 방사성핵종 수송 계산에서 고려해야 하는 것으로 결정된 핵종은 그림에서 빗금으로 강조하였다.

2.1.3.1. 4n 계열

4n 붕괴계열(즉, 핵종 질량수가 4의 배수)에 대한 전체 붕괴도 및 가상 케이스 계산에 사용된 단순 붕괴사슬은

Fig. 2의 좌측 첫 번째에 제시하였다. 전체 구성핵종 중 수송 계산에서 우선적으로 제외 가능한 핵종 및 그 근거를 요약하면 다음과 같다.

- 초기 재고량=0: ^{252}Cf, ^{248}Cm, ^{244}Pu, ^{240}U, ^{240m}Np, ^{236}Np, ^{236}Pu
- 단반감기: ^{244}Cm (^{240}Pu 재고량에 포함), ^{232}U
- 모핵종과 평형상태 (초기 재고량=0, 모핵종에 비해 매우 짧은 반감기): ^{228}Ra, ^{228}Ac, ^{228}Th, ^{224}Ra, ^{220}Rn, ^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Po, ^{208}Tl

단순 붕괴사슬을 적용하여 가상 케이스에 대한 평가를 수행한 결과 본 계열의 경우 최초 약 100,000년간은 ^{240}Pu에 의한 선량, 이후 기간에서는 ^{236}U에 의한 선량이 지배적 (단, 이전에 비해 낮은 수준)인 것으로 나타났으며, 이외의 다른 모든 핵종은 동 계열에 의한 총 선량에 대한 기여도가 낮거나 무시할 만한 수준이므로 수송 계산에서 제외할 수 있다. 단, ^{232}Th의 경우 40,000년 후 전체 토륨 양의 50% 이상을 차지하므로 토륨 용해도를 보다 정확하게 고려하기 위해 수송 계산에 포함하였다.

이에 따라 본 붕괴계열에서는 최종적으로 ^{240}Pu, ^{236}U 및 ^{232}Th만 방사성핵종 수송 계산에서 "Important" 그룹으로 선정되었다. 한편, ^{244}Cm은 "What-if" 케이스에 대해 중요할 수 있으므로 "Less important"로 분류되었다.

2.1.3.2. 4n+1 계열

4n+1 붕괴계열 (즉, 핵종 질량수가 4의 배수+1)에 대한 전체 붕괴도 및 가상 케이스 계산에 사용된 단순 붕괴사슬은 Fig. 2의 좌측 두 번째에 제시하였다. 전체 구성핵종 중 수송 계산에서 우선적으로 제외 가능한 핵종 및 그 근거를 요약하면 다음과 같다.

- 초기 재고량=0: ^{249}Cf, ^{245}Am
- 단반감기: ^{249}Bk, ^{241}Pu (^{241}Am 재고량에 포함), ^{237}U (^{237}Np 재고량에 포함. ^{241}Pu 붕괴로 인한 생성은 ^{241}Am 핵종 내 ^{241}Pu 초기 재고량으로 포함), ^{233}Pa (^{233}U 재고량에 포함)
- 모핵종과 평형상태 (초기 재고량=0, 모핵종에 비해 매우 짧은 반감기): ^{225}Ra, ^{225}Ac, ^{221}Fr, ^{217}At, ^{213}Bi, ^{213}Po, ^{209}Tl

단순 붕괴사슬을 적용하여 가상 케이스에 대한 평가를 수행한 결과 본 계열의 경우 ^{241}Am, ^{237}Np 및 ^{229}Th에 의한 선량이 지배적인 것으로 나타났으며, 이외의 다른 모든 핵종은 동 계열에 의한 총 선량에 대한 기여도가 낮거나 무시할 만한 수준이므로 수송 계산에서 제외할 수 있다. 단, ^{245}Cm 핵종은 이를 무시하는 경우 ^{241}Am 핵종이 너무 빠르게 감소할 것이므로 계산에서 고려되어야 하며, 딸핵종에 대한 정확한 결과를 얻기 위해 ^{233}U를 추가적으로 포함하였다.

이에 따라 본 붕괴계열에서는 최종적으로 ^{245}Cm, ^{241}Am, ^{237}Np, ^{233}U 및 ^{229}Th (딸핵종과 평형) 만 방사성핵종 수송 계산에서 "Important" 그룹으로 선정되었다. 한편, ^{241}Pu은 "What-if" 케이스에 대해 중요할 수 있으므로 "Less important"로 분류되었다.

2.1.3.3. 4n+2 계열

4n+2 붕괴계열 (즉, 핵종 질량수가 4의 배수+2)에 대한 전체 붕괴도 및 가상 케이스 계산에 사용된 단순 붕괴사슬은 Fig. 2의 좌측 세 번째에 제시하였다. 전체 구성핵종 중 수송 계산에서 우선적으로 제외 가능한 핵종 및 그 근거를 요약하면 다음과 같다.

- 초기 재고량=0: ^{250}Cf
- 단반감기: ^{238}Np (^{238}Pu 재고량에 포함), ^{242}Am (^{242}Pu 및 ^{238}Pu/^{234}U 재고량에 포함), ^{242}Cm (^{238}Pu 또는 ^{234}U 재고량에 포함), ^{234}Th (^{234}U 재고량에 포함), ^{234m}Pa (^{234}U 재고량에 포함)
- 모핵종과 평형상태 (초기 재고량=0, 모핵종에 비해 매우 짧은 반감기): ^{222}Rn, ^{214}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{210}Bi, ^{210}Po

단순 붕괴사슬을 적용하여 가상 케이스에 대한 평가를 수행한 결과 본 계열의 경우 ^{238}Pu, ^{242}Pu, ^{210}Pb, ^{230}Th 및 ^{226}Ra에 의한 선량이 지배적인 것으로 나타났으며, 이외의 다른 모든 핵종은 동 계열에 의한 총 선량에 대한 기여도가 낮거나 무시할 만한 수준이므로 수송 계산에서 제외할 수 있다. 단, 딸핵종에 대한 정확한 결과를 얻기 위해 ^{238}U 및 ^{234}U를 추가적으로 포함하였다. 또한, ^{242m}Am 및 ^{238}Pu은 급속 방출 계산에 포함되며, 결정론적 계산에서 무시할 수 있으나 이 경우 전자의 핵종은 ^{238}Pu 또는 ^{234}U 재고량, 후자의 핵종은 ^{234}U 재고량에 각각 포함해야 한다.

이에 따라 본 붕괴계열에서는 최종적으로 ^{246}Cm, ^{242m}Am, ^{242}Pu, ^{238}U, ^{238}Pu, ^{234}U, ^{230}Th, ^{226}Ra 및 ^{210}Pb (딸핵종과 평형)만 방사성핵종 수송 계산에서 "Important" 그룹으로 선정되었다. 한편, ^{242m}Am 및 ^{238}Pu은 "What-if" 케이스에 대해 중요할 수 있으므로 "Less important"로 분류되

었다.

2.1.3.4. 4n+3 계열

4n+3 붕괴계열(즉, 핵종 질량수가 4의 배수+3)에 대한 전체 붕괴도 및 가상 케이스 계산에 사용된 단순 붕괴사슬은 Fig. 2의 좌측 네 번째에 제시하였다.

- 초기 재고량=0: ^{251}Cf, ^{247}Cm
- 단반감기: ^{243}Pu, ^{239}Np (^{239}Pu 재고량에 포함), ^{243}Cm (^{239}Pu 재고량에 포함), ^{231}Th (^{231}Pa 재고량에 포함)
- 모핵종과 평형상태(초기 재고량=0, 모핵종에 비해 매우 짧은 반감기): ^{227}Th, ^{223}Fr, ^{223}Ra, ^{219}Rn, ^{215}Po, ^{211}Pb, ^{211}Bi, ^{211}Po, ^{207}Tl

단순 붕괴사슬을 적용하여 가상 케이스에 대한 평가를 수행한 결과 본 계열의 경우 ^{239}Pu 및 ^{231}Pa에 의한 선량이 지배적이지만 ^{243}Am 및 ^{227}Ac 또한 기여하는 것으로 나타났으며, 이외의 다른 모든 핵종은 동 계열에 의한 총 선량에 대한 기여도가 낮거나 무시할 만한 수준이므로 수송계산에서 제외할 수 있다. 단, 딸핵종에 대한 정확한 결과를 얻기 위해 ^{235}U를 추가적으로 포함하였다.

이에 따라 본 붕괴계열에서는 최종적으로 ^{243}Am, ^{239}Pu, ^{235}U, ^{231}Pa 및 ^{227}Ac (딸핵종과 평형)만 방사성핵종 수송계산에서 "Important" 그룹으로 선정되었다. 한편, ^{243}Cm은 "What-if" 케이스에 대해 중요할 수 있으므로 "Less important"로 분류되었다.

2.2. 핀란드 사례

상이한 방사성핵종의 방사선적 영향은 광범위한 범위에 걸쳐 다양하게 나타나며, 상대적으로 적은 수의 핵종이 대부분의 영향을 지배한다. 이에 따라 폐쇄후 안전성 평가에 가장 중요한 방사성핵종의 제한된 집합만 고려하더라도 충분히 정확한 결과를 획득할 수 있으며, 이러한 방사성핵종을 식별하기 위해 선별 절차가 적용되었다[9]. 다수의 방사성핵종은 몇 가지 단순한 규칙을 사용하여 제외할 수 있으며, 나머지는 보다 정교하지만 여전히 간단한 수단을 통해 제외할 수 있다.

2.2.1. 노심 연소 특성에 따른 방사능 계산

처분장 선원항을 구성하는 방사성핵종 재고량은 사용후핵연료(UO_2) 매트릭스, 핵연료봉 내 빈 공간, 지르코늄 합금(대부분 피복재), 기타 금속 부품과 같은 4개의 요소로 구분되며, 각 요소에 대해 즉각 방출 또는 상이한 방출률이 적용된다. 선원항 구성요소별 방사능은 주로 ORIGEN/SCALE5를 사용하여 계산하였으며, 원소별 조성은 SCALE5로 평가하였다. 일부 방사화생성물(^{10}Be, ^{14}C, ^{36}Cl, ^{91}Nb, ^{93}Zr)의 경우 부품 고유 재고량을 생성하기 위해 핀란드 VTT 기술연구소에서 개발한 3차원 몬테카를로 중성자 거동 해석 프로그램인 SERPENT 전산코드를 사용하였다.

2.2.2. 안전성 관련 핵종 선별

ORIGEN 전산코드를 활용하여 1,000개 이상 핵종의 농도를 모든 시간에 대해 계산할 수 있으나 방사성핵종 누출 및 수송 모델에 포함하기에는 그 수가 너무 많으므로 Fig. 3에 제시된 선별과정[10]에 따라 잠재적인 안전성 관련 핵종을 선정하였다.

1단계: 방사능 재고량 기준 적용

우선적으로, 방사능 재고량이 '0'인 방사성핵종(즉, ORIGEN의 기준 문턱값 미만 방사능, 10^{-30} GBq $(tU)^{-1}$)은 1단계에서 제외된다. 이러한 기준 재고량은 방사선적 영향 관점에서 신중하게 선택해야 하며, 이를 위한 간단한 방법은 각 핵연료 유형에 대해 수행된 일련의 방사능 계산결과 중 각 방사성핵종 및 구성요소에 대한 30년~1,000,000년 사이의 핵종별 방사능 중 최대값을 선택하는 것이다.

2단계: 위험도 지수(Risk Quotient, 'RQ') 기준 적용

다음으로, 위험도 지수(RQ)가 1 미만인 방사성핵종이 2단계에서 제외된다. 해당 수치는 '전기간에 걸친 방사성핵종의 최대 방사능(A_{max})'과 '해당 핵종 섭취에 대한 선량환산인자($DCF_{ingestion}$)'의 곱을 'RQ 제한치(RQ_{limit})'를 기준으로 정규화한 값(즉, $RQ=(A_{max}DCF_{ingestion})/RQ_{limit}$)이다. 선별 목적으로 사용된 방사성독성 및 반감기는 'Radiation Decay 코드(v4.1)'를 사용하여 도출되었다.

3단계: 반감기 기준 적용

이후 3단계에서는 반감기가 1년 미만인 방사성핵종이 제외되며, 주요 붕괴사슬의 단수명 방사성핵종이 생태계 평가에 고려된다. 1~3단계 적용을 통해 방사성핵종의 개수가 1,485개에서 94개로 감소된다.

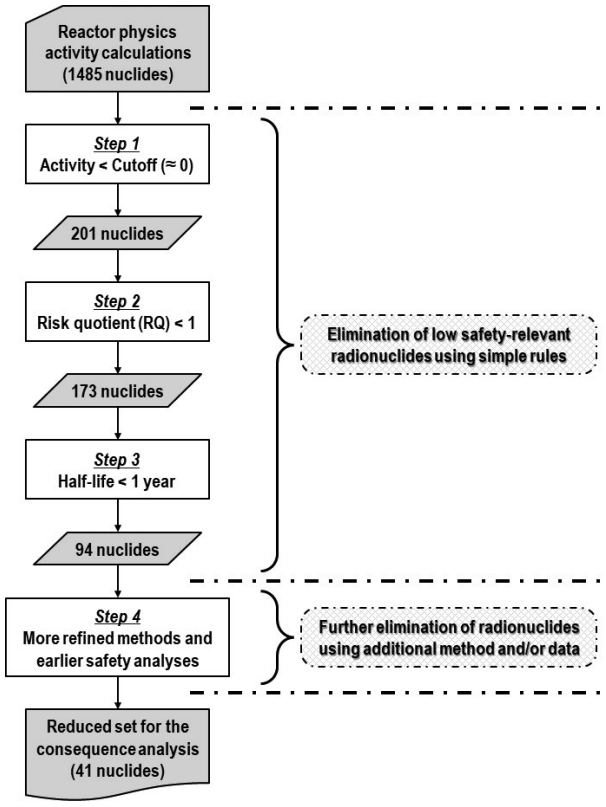

Fig. 3. Screening process of radionuclides to be analyzed in the radionuclide release scenario for a KBS-3 repository at Olkiluoto in Finland.

4단계: 기타 기준 적용

4단계의 목적은 극단반감기(캐니스터 및 완충재 내 체류시간 대비) 방사성핵종을 추가적으로 제거하고, 방사성핵종 누출 및 수송 계산을 위해 이러한 목록을 관리 가능한 개수(특히 신뢰할 수 있는 입력자료 측면)까지 감소시키는 것이다. 동 단계에서는 1~3단계의 기준 이외에 다음과 같은 여러 요소를 조합하여 고려한다.

- 반감기 및 지권(Geosphere)에서의 이동/지연시간 대비 근계 내 지연시간의 자릿수
- 핵연료집합체 내 주요 물질(UO_2 매트릭스, 피복재 또는 기타 금속 부품)에 기반한 방사능 방출률
- 붕괴사슬에서 방사성핵종 또는 그 생성물의 수치적 취급
- 근계영역에서의 용해도 제한치
- 캐니스터 또는 완충재로부터의 방사능 방출률을 사용하여 섭취 선량환산계수를 곱하여 계산된 '선량 척도'

의사결정 과정에서 기존 안전성 평가를 통해 획득한 동일 또는 관련 방사성핵종에 대한 계산결과를 활용하였다. 최종 선별과정에서 방사성핵종을 포함 또는 제외한 근거는 Table 4에 기술되어 있으며, 이를 통해 최종적으로 방사성핵종 누출 및 수송 모델에 고려해야 하는 41개 방사성핵종('Category' 컬럼에 'IN'으로 표기)을 선정[10]하였다. 이러한 최종 목록에는 핀란드 원자력 및 방사선 안전 규제기관(STUK)의 규제지침 YVL D.5 [11]에서 장기 안전성과 관련하여 환경으로의 방사능 방출 제한치가 제시된 다음 원소 및 방사성핵종이 모두 포함되어 있다.

- 장수명 알파 방출 동위원소: Ra, Th, Pa, Pu, Am, Cm
- 장수명 우라늄 동위원소
- 기타: ^{79}Se, ^{94}Nb, ^{129}I, ^{237}Np, ^{14}C, ^{36}Cl, ^{135}Cs, ^{126}Sn, ^{99}Tc, ^{93}Mo, ^{93}Zr, ^{59}Ni, ^{107}Pd

2.2.3. 붕괴사슬 핵종

방사성핵종 누출 및 수송 모델링에서 고려되는 방사성 붕괴계열은 Fig. 4와 같다. 단반감기 핵종(^{227}Ac 등)은 영속평형이 되는 것으로 가정하여 초기 재고량을 모핵종 재고량에 합산한다. 또한, 선량 기여분은 전체(또는 관련 부분) 붕괴사슬에 대해 합산된 선량계수를 적용하여 고려된다.

3. 결과 및 고찰

전 세계 원전 운영국 중 직접처분 정책을 채택하고 있는 국가 중 KBS-3 방식을 활용한 심층처분장 건설계획에 대한 승인이 완료된 스웨덴 및 핀란드의 처분 안전성 평가를 위해 수행된 방사성핵종 선정과정을 우선적으로 검토·분석하였다. 스웨덴 심층처분장에 대한 방사성핵종 수송 계산에서는 다음과 같은 기준을 적용하여 핵종 목록을 선정하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

- 핵분열생성물 및 방사화생성물
  - 반감기: 10년 미만 제외
  - 총 방사성독성(=운영후 40년 경과시점 재고량×경구 섭취에 대한 선량계수): 0.1 미만 제외
- 붕괴사슬 핵종(4n~4n+3 계열)
  - 재고량='0' 또는 계열 전체 선량에 대한 기여도가 낮

Table 3. Screening results of radionuclides to be included in the transport calculation based on half-life, inventory, transport property, and radiotoxicity (Finland)

Nuclide	Consideration				Category‖	Remarks
	Half-life*	Inventory†	Transport property‡	Radiotoxicity§		
^{227}Ac	S			H	OUT	Taken into account in the decay chain (as the daughter of ^{231}Pa)
^{108m}Ag		VL			IN	As "scoping" nuclide because it is in the rod cluster control assembly of PWR canisters
^{241}Am	M			H	IN	
^{242m}Am	M	H	Very high K_d	H	OUT	
^{243}Am	S		High K_d	H	IN	
^{133}Ba	S	H			OUT	
^{10}Be	L	H			IN	
^{14}C			N.S		IN	
^{113m}Cd	S	VH			OUT	
^{144}Ce	S				OUT	
^{249}Cf		L	S.R	H	OUT	
^{250}Cf		L			OUT	
^{251}Cf		L		H	OUT	
^{252}Cf		L	S.R	H	OUT	
^{36}Cl			N.S, S.TT		IN	
^{242}Cm	S		High K_d, S.R		OUT	
^{243}Cm	S		High K_d, S.R		OUT	
^{244}Cm	S		High K_d, S.R		OUT	
^{245}Cm	S		High K_d	H	IN	
^{246}Cm	S		High K_d	H	IN	
^{247}Cm	L	L		H	OUT	
^{248}Cm		EL		H	OUT	
^{60}Co	S		S.S		OUT	
^{134}Cs	S				OUT	
^{135}Cs	VL	VH			IN	
^{137}Cs	S	VH			IN	
^{152}Eu	S	L	L.RT		OUT	
^{154}Eu	S				OUT	
^{155}Eu	S				OUT	
^{55}Fe	S		L.RR, Sorption		OUT	
^{3}H	S	H			OUT	
^{182}Hf	L	VL	QR		OUT	
^{166m}Ho	L	QL	S.R		OUT	
^{129}I	L		N.R		IN	
^{137}La	L	L	S.R		OUT	
^{93}Mo	L				IN	
^{91}Nb	S	L			IN	
^{92}Nb	L	H	S.R		IN	
^{93m}Nb	S	VH			IN	If short groundwater travel time, it can become important.

Table 3. Continued

Nuclide	Consideration				Category‖	Remarks
	Half-life*	Inventory†	Transport property‡	Radiotoxicity§		
^{94}Nb	L	H			IN	
^{95}Nb	S				OUT	No daughter of any safety relevant nuclides
^{144}Nd	L	L			OUT	
^{59}Ni	L	RH			IN	
^{63}Ni	M	VH			IN	
^{236}Np	L	L			OUT	
^{237}Np	L	H			IN	
^{231}Pa			H.RR	H	IN	One of highest release rates in the long term
^{210}Pb	S	L		H	OUT	Secular equilibrium with ^{226}Ra
^{107}Pd	L	H			IN	
^{145}Pm	S	H	S.R		OUT	
^{146}Pm	S	H	S.R		OUT	
^{147}Pm	S	H	S.R		OUT	
^{236}Pu	S				OUT	
^{238}Pu	S	VH		H	IN	Produces ^{234}U
^{239}Pu	L	H		H	IN	
^{240}Pu	L	H		H	IN	
^{241}Pu	S		High K_d		IN	Added to ^{241}Am
^{242}Pu	L	H		H	IN	
^{244}Pu	L	L		H	OUT	
^{226}Ra	L			H	IN	
^{228}Ra				H	OUT	Added to ^{228}Th
^{87}Rb	VL	L	S.R		OUT	
^{101}Rh	S	L			OUT	
^{102m}Rh	S	L			OUT	
^{106}Ru	S				OUT	
^{125}Sb	S				OUT	Taken into account through decay chain
^{79}Se	L	H			IN	
^{32}Si	M	L			OUT	
^{146}Sm	VL	L	L.RR		OUT	
^{147}Sm	L	L	L.RR		OUT	
^{151}Sm			High K_d		IN	
^{121m}Sn	S	H	S.RR		OUT	
^{126}Sn	L	H			IN	
^{89}Sr	S				OUT	
^{90}Sr	S	VH			IN	Important for the initially penetrated canister scenario
^{157}Tb	M	L	L.RR		OUT	
^{158}Tb	M	L	L.RR		OUT	
^{98}Tc	L	L	L.RR		OUT	
^{99}Tc	L	H			IN	
^{125m}Te					OUT	Daughter of ^{125}Sb

Table 3. Continued

Nuclide	Consideration				Category‖	Remarks
	Half-life*	Inventory†	Transport property‡	Radiotoxicity§		
^{228}Th	S		$K_d > {}^{228}$Ra		OUT	Secular equilibrium with parent/daughter
^{229}Th	L	H		H	IN	
^{230}Th	L	H		H	IN	
^{232}Th	L	IG from ^{236}U		H	IN	Accounted for in the solubility limits of Th
^{171}Tm	S		L.RR		OUT	
^{232}U	S	L	L.RR	H	OUT	
^{233}U	VL				IN	
^{234}U	VL	H			IN	
^{235}U	VL	H			IN	
^{236}U	VL	H			IN	
^{238}U	VL	H			IN	
^{90}Y	S			O.S	OUT	Does not live long to migrate long distances
^{93}Zr	L	H			IN	
^{95}Zr	S	L		N.I	OUT	Short half-life daughter and no safety relevant daughters

Notes) *Half-life: S = Short, M = Medium, L = Long, VL = Very Long
† Inventory: EL = Extremely Low, VL = Very Low, QL = Quite Low, L = Low, RH = Relatively High, H = High, VH = Very High, IG = InGrowth
‡ Transport property: L.RR = Low Release Rate, S.RR = Slow Release Rate, H.RR = High Release Rate, L.RT = Long Release Time, S.TT = Short Transport Time, S.R = Slow Release, Q.R = Quick Release, N.S = Non-Sorbing, S.S = Strong Sorption, N.R = No Retention
§ Radiotoxicity: H = High, N.I = Not Included, O.S = Of Significance to the biosphere
‖ In this column, "IN" and "OUT" represent "included" and "excluded" radionuclide in the transport calculation, respectively.

은 핵종 제외
- 단반감기 딸핵종: 모핵종과 평형상태로 가정(모핵종 선량환산인자에 포함)
- 붕괴계열 초기 일부 단반감기 핵종: 해당 핵종의 초기양(몰)을 딸핵종에 합산
- 제외 여부를 결정하기 어려운 일부 핵종: 안전성 측면에서 모든 결정론적 계산에 포함. 선량 기여도가 미미한 것으로 확인된 핵종의 경우 확률론적 계산에서 제외.

또한, 핀란드 심층처분장에 대한 방사성핵종 수송 계산에서는 다음과 같은 기준을 적용하여 핵종 목록을 선정하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

- 방사능 재고량: 문턱값(= 10^{-30} GBq $(tU)^{-1}$) 미만 제외
- 위험도 지수(RQ= 최대 방사능 × 경구 섭취 선량환산인자/RQ 제한치): 1 미만 제외
- 반감기: 1년 미만 제외
- 다음 요소를 조합하여 추가 제외
  - 반감기 및 지권(Geosphere)에서의 이동/지연시간 대비 근계 내 지연시간
  - 핵연료집합체 내 주요 물질에 기반한 방사능 방출률
  - 붕괴사슬에서 방사성핵종 또는 그 생성물의 수치적 취급
  - 근계영역에서의 용해도 제한치
  - 선량 지표(= 방출률 × 섭취 선량계수)

양국의 KBS-3 방식 심층처분시설에 대한 방사선학적 안전성 평가에서 고려된 방사성핵종 선정결과를 Table 4에 비교·요약하였다. 해당 표를 통해 대부분의 핵종(핵분열/방사화생성물 18개, 붕괴계열 19개)은 양국에서 공통적으로 고려하고 있음을 알 수 있다. Table 4에서 스웨덴에서만 고려하는 것으로 제시된 8개 핵종 모두 핀란드에서는 다음과 같은 특성을 고려하여 Fig. 3에 제시된 선별과정의 4단계에서 제외되었다.

Table 4. Comparison for the screening results of radionuclides considered in the radiological safety assessment on the KBS-3 repository in Sweden and Finland

Category		Both countries (37)*			Sweden only (8)	Finland only (4)
Fission and activation products		• ^{14}C • ^{63}Ni • ^{93}Mo • ^{94}Nb • ^{108m}Ag • ^{135}Cs	• ^{36}Cl • ^{79}Se • ^{93m}Nb • ^{99}Tc • ^{126}Sn • ^{137}Cs	• ^{59}Ni • ^{90}Sr • ^{93}Zr • ^{107}Pd • ^{129}I • ^{151}Sm	• ^{3}H • ^{113m}Cd • ^{121m}Sn • ^{152}Eu • ^{166m}Ho	• ^{10}Be • ^{91}Nb • ^{92}Nb
Decay chain	4n	• ^{240}Pu	• ^{236}U	• ^{232}Th	–	–
	4n + 1	• ^{245}Cm • ^{233}U	• ^{241}Am • ^{229}Th	• ^{237}Np	–	• ^{241}Pu
	4n + 2	• ^{246}Cm • ^{238}Pu • ^{226}Ra	• ^{242}Pu • ^{234}U	• ^{238}U • ^{230}Th	• ^{242m}Am • ^{210}Pb	–
	4n + 3	• ^{243}Am • ^{235}U	• ^{239}Pu • ^{231}Pa	–	• ^{227}Ac	–

Notes) *Values enclosed in parenthesis represent the total number of nuclides categorized into each group.

- ^{3}H, ^{113m}Cd: 반감기
- ^{121m}Sn, ^{152}Eu: 반감기, 방출특성
- ^{166m}Ho: 재고량
- ^{242m}Am: 분배계수 및 반감기 대비 수송시간
- ^{210}Pb: ^{226}Ra와 영속평형
- ^{227}Ac: ^{231}Pa의 딸핵종으로 고려

또한, Table 4에서 핀란드에서만 고려하는 것으로 제시된 4개 핵종의 경우 스웨덴에서는 다음과 같은 이유로 포함되지 않았다.

- ^{10}Be, ^{91}Nb, ^{92}Nb: 가상 케이스에 대한 재고량 정보(즉, BWR38)에 미포함
- ^{241}Pu: ^{241}Am 재고량에 포함(단, "What-if" 케이스에 대해 중요할 수 있으므로 "Less important"로 분류

Table 4의 목록을 유사한 유형의 핵연료를 사용하는 다른 폐기물 관리기관의 안전성 평가에서 고려된 목록[12]과 비교한 결과 해당 표에 제시된 대부분의 핵종이 공통적으로 포함되어 있음을 확인하였으며, 일부 누락된 핵종은 붕괴사슬 처리 또는 사용후핵연료 유형의 차이 때문인 것으로 추정된다[10]. 이와 같은 사항을 고려할 때, 국내 고준위방폐물 심층처분시설에 대한 대부분의 정보가 결정되지 않은 현 시점에서는 방사선학적 안전성 평가시 우선적으로 Table 4에 제시된 모든 방사성핵종을 포괄적으로 고려할 필요가 있다.

추가적으로, 상기 검토결과를 토대로 국내 사용후핵연료 관리시설 설계기술 개발의 일환으로 수행되어야 하는 방사선학적 안전성 평가에서 고려되어야 하는 방사성핵종 목록 선정개념(안)을 Fig. 5와 같이 도출하였다. 추후 국내 심층처분시설의 설계가 진행됨에 따라 고유 특성을 반영한 보다 세부적인 평가에서는 해당 그림에 제시된 절차에 따라 선정된 방사성핵종만 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결 론

심층처분된 고준위방폐물로부터 근계·원계영역 및 생태계로 누출될 수 있는 잠재적 방사선원항 중 특정 기준을 적용하여 계산결과에 중요한 영향을 미치는 핵종만 포함하여 처분 안전성 평가를 수행함으로써 정확도에 미치는 영향을 최소화하면서 계산시간을 단축할 수 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 전 세계 원전 운영국 중 직접처분 정

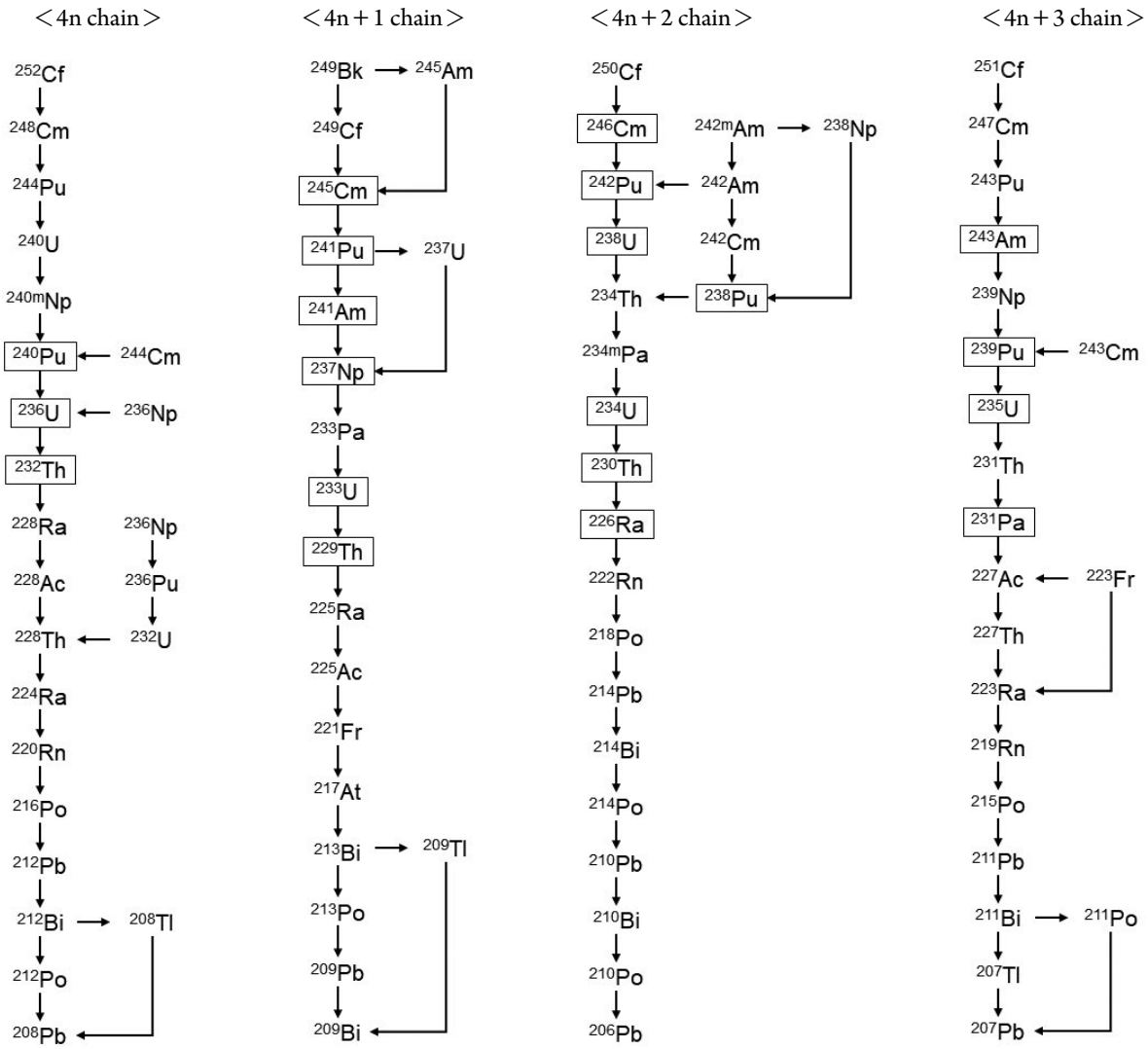

Fig. 4. Decay chains to stable isotopes for 4n through 4n + 3 nuclides in the radionuclide transport calculation (Finland). The simplified chain for the calculation case only consists of radionuclides marked with the rectangle.

책을 채택하고 있는 국가 중 KBS-3 방식을 활용한 심지층 처분시설 건설계획에 대한 승인이 완료된 스웨덴 및 핀란드의 처분 안전성 평가를 위한 방사성핵종 선정과정을 검토 및 분석하였다.

세부적인 적용방법에는 다소 차이가 있지만 양국 모두 방사능 재고량, 반감기, 방사성독성, 위험도 지수, 수송 특성 등을 종합적으로 고려하여 방사성핵종 목록을 선정하고 있음을 확인하였다. 양국의 KBS-3 방식 심층처분시설에 대한 방사선학적 안전성 평가에서 고려된 방사성핵종 선정결과를 비교한 결과 대부분의 핵종을 공통적으로 고려하고 있으며, 특정 국가에서만 고려하는 것으로 제시된 핵종 또한 붕괴사슬 처리 또는 사용후핵연료 유형의 차이 때문인 것으로 추정된다. 이와 같은 사항을 고려할 때, 국내 고준위방폐물 심층처분시설에 대한 대부분의 정보가 결정되지 않은 현 시점에서는 방사선학적 안전성 평가시 우선적으로 Table 4에 제시된 모든 방사성핵종을 포괄적으로 고려할 필요가 있다.

상기 결과를 토대로 방사선학적 안전성 평가에서 고려되어야 하는 방사성핵종 목록 선정개념(안)을 Fig. 5와 같이 도출하였으며, 이와 같은 결과는 향후 국내 심층처분시설 확보를 위한 방사선학적 안전성 평가 수행과정에서 기술적 근거자료로 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 추후 국내 고유 특성을 반영한 보다 세부적인 평가에서는 해당 절차에 따라 선정된 방사성핵종만 고려하는 것이 바람직

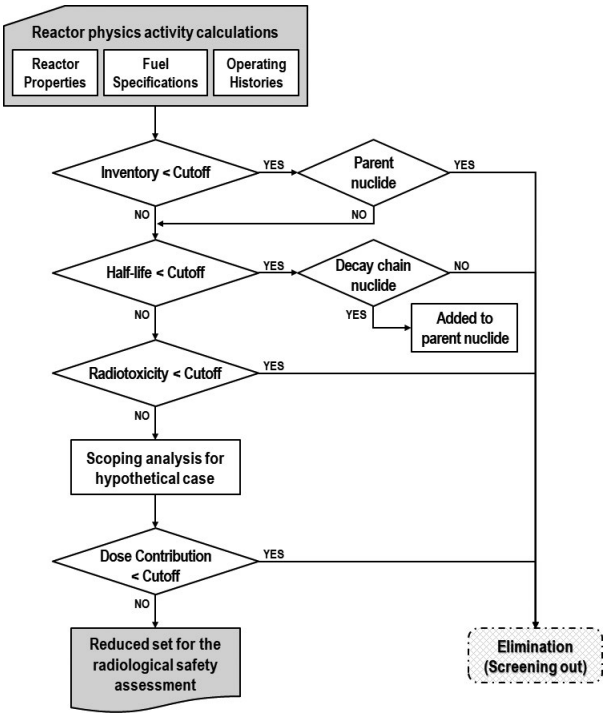

Fig. 5. Screening concept (draft) of radionuclides to be considered for the radiological safety assessment of the domestic KBS-3 type geological disposal facility in Korea.

할 것으로 판단되지만, 각 기준에 대한 정량적 제한치를 결정하기 위해서는 추가적인 연구를 통해 그 근거를 확보해야 한다.

사 사

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20211710200001A, 사용후핵연료 관리시설 설계기술 개발).

참고문헌

1. Nuclear Safety and Security Commission. 2021. Enforcement Decree Of The Nuclear Safety Act. Presidential Decree No. 31824.
2. Nuclear Safety and Security Commission. 2019. Standards for Radiation Protection, and etc. Notice No. 2019-10.
3. Ministry of Trade, Industry and Energy. 2017. Radioactive Waste Management Act. Act No. 15082.
4. Ministry of Trade, Industry and Energy. 2021. The Second Basic Plan for the Management of High-Level Radioactive Waste (Draft).
5. Nuclear Safety and Security Commission. 2021. General Standards for Geological Disposal Facility of High-level Radioactive Waste. Notice No. 2021-21.
6. SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB). 2010. Radionuclide Transport Report for the Safety Assessment SR-Site. SKB TR-10-50.
7. Rune Håkansson. 2000. Beräkning av nuklidinnehall, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle (Swedish version). SKB Rapport R-99-74.
8. European Union. 1996. Council Directive 96/92/EURATOM of 13 May 1996 Laying Down Basic Safety Standards for the Protection of the Health of Workers and the General Public against the Dangers Arising from Ionizing Radiation. Luxembourg: European Commission.
9. Posiva Oy. 2012. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System 2012. POSIVA 2012-09.
10. Posiva Oy. 2013. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Models and Data for the Repository System 2012. POSIVA 2013-01.
11. STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority). 2018. Disposal of Nuclear Waste. GUIDE YVL D.5.
12. Nuclear Energy Agency. 2011. Spent Nuclear Fuel Assay Data for Isotopic Validation: State-of-the-Art Report. NEA/NSC/WPNCS/DOC (2011)5.